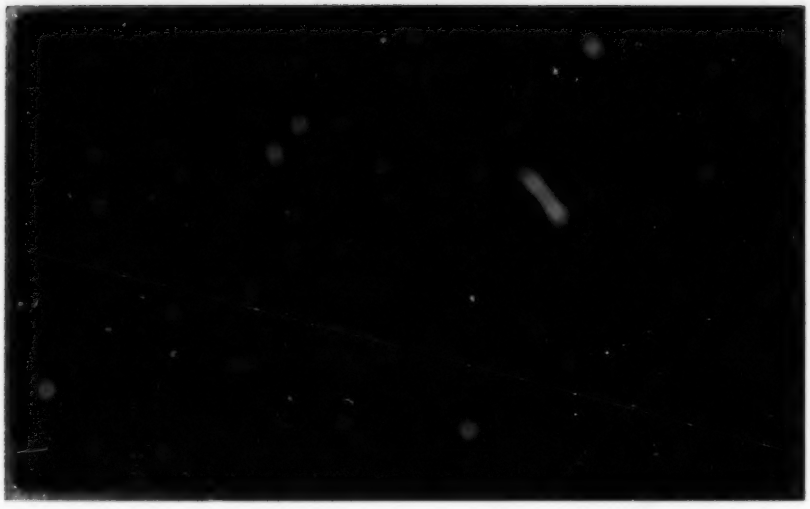
CENTRE DE RECHERCHE
SUR LES TRANSPORTS
(C.R.T.)
CENTRE FOR RESEARCH
ON TRANSPORTATION

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL
ÉCOLE DES HAUTES ÉTUDES COMMERCIALES
ÉCOLE POLYTECHNIQUE



CENTRE DE RECHERCHE SUR LES TRANSPORTS
UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL
C.P. 6128, SUCCURSALE A
MONTRÉAL
CANADA H3C 3J7

TÉLÉPHONE : (514) 343-7575
EMAIL : crt@crt.umontreal.ca
TÉLÉCOPIEUR (FAX) : (514) 343-7121

92-07827/

CRT-842

Transport et informatique parallèle

par

Teodor G. Crainic
Michel Gendreau
Gilbert Laporte
Christian Lardinois

Centre de recherche sur les transports, Université de Montréal, C.P. 6128, succursale A, Montréal, Canada H3C 3J7.

Centre de recherche sur les transports — Publication #842

Juillet 1992

Dépôt légal – Bibliothèque nationale du Québec,
Bibliothèque nationale du Canada, 1992

RÉSUMÉ

Cet article passe en revue les applications du calcul parallèle en transport et les perspectives de recherche suscitées par cette technique. On examine l'apport du parallélisme à l'étude de plusieurs problèmes de recherche opérationnelle classique liés aux transports, et l'on décrit quelques domaines d'application où l'informatique parallèle trouve sa justification aux niveaux industriel et commercial.

Mots-clés : transport, calcul parallèle, recherche opérationnelle, informatique, transputers.

- - - - - - - - - - - -

ABSTRACT

This paper describes a number of applications of parallel computing in the field of transportation, as well as some research avenues derived from this technique. The impact of parallel computing on the study of several classical operations research problems arising in transportation is examined, and a number of industrial and commercial applications where parallel computing could prove relevant are described.

Key words : transportation, parallel computing, operations research, computer science, transputers.

1. INTRODUCTION

Depuis une bonne vingtaine d'années, mais de façon plus évidente au cours des derniers dix à quinze ans, le monde du transport a connu des changements importants liés, selon les secteurs considérés, à l'étalement urbain, à la déréglementation et à la globalisation des marchés, à la baisse des prix des matières premières, à la concurrence des compétiteurs étrangers, etc., de telle sorte que la réalité, à l'aube du 21^{e} siècle, est bien différente de celle qui prévalait dans les années 70 et 80. Parallèlement, avec les immenses progrès de l'électronique, de l'informatique et des télécommunications, de nouvelles possibilités et de nouveaux horizons technologiques se sont ouverts et s'ouvrent constamment aux techniciens et aux décideurs d'aujourd'hui. Dans le secteur du transport en particulier, des changements majeurs sont en cours dans des domaines aussi diversifiés que le contrôle en temps réel du trafic urbain à l'aide d'ordinateurs et de systèmes de communication et de guidage à bord des véhicules, la localisation et l'identification par satellite de camions ou de trains en opération sur un territoire donné, l'organisation au jour le jour, voire d'heure en heure, à la fois des opérations des transporteurs et des chaînes logistiques multimodales grâce à l'échange de données et de documents informatisés, etc.

Ces développements technologiques se caractérisent très souvent par leur complexité intrinsèque, par leur grande taille et par la nécessité d'une très grande rapidité de traitement, souvent combinée à l'obligation d'opérer dans des contextes où l'incertain et l'aléatoire occupent une place importante. Ces exigences font naître à leur tour de nouveaux besoins technologiques de plus en plus élevés, notamment en termes de puissance de traitement informatique. Le *calcul parallèle*

apparaît comme une réponse partielle à ces problèmes, et aussi comme source de nouveaux défis scientifiques.

Le présent article a pour but de brosser un tableau des applications possibles du calcul parallèle en transport et des perspectives de recherche suscitées par cette technologie. On y présentera notamment plusieurs travaux en voie de réalisation ou à l'état de projet au Centre de recherche sur les transports (C.R.T.) de l'Université de Montréal.

Dans la section suivante, le parallélisme est présenté comme un complément naturel aux méthodes de recherche opérationnelle traditionnellement utilisées pour la création d'outils de planification et de gestion des systèmes de transport. La section 3 aborde les liens entre le parallélisme et les fondements théoriques et méthodologiques de la recherche en transport; l'apport du parallélisme à l'étude de plusieurs problèmes classiques y est étudié. Dans la section 4, on s'intéresse à trois domaines d'application où l'informatique parallèle trouve sa justification au niveau industriel et commercial. La conclusion suit à la section 5.

2. RECHERCHE OPÉRATIONNELLE, BESOIN DE PUISSANCE ET PARALLÉLISME

Les tâches de planification et de gestion dans l'industrie du transport se sont toujours caractérisées par leur diversité et leur complexité, mais depuis longtemps aussi – et surtout depuis dix à quinze ans – ce domaine a bénéficié du développement de différents logiciels, outils et autres systèmes d'aide à l'analyse et à la prise de décision qui se sont bâtis autour des progrès de l'informatique et de la recherche opérationnelle. Les systèmes et outils de planification et de gestion EMME/2, STAN et HASTUS [4, 10, 18] développés au C.R.T. sont,

parmi d'autres, des exemples de réussites exceptionnelles – scientifiquement, techniquement et commercialement – du mariage de la recherche opérationnelle et de l'informatique appliquées aux transports.

Ce mariage demeure plus que jamais l'allié le plus sûr de l'efficacité, de la productivité et de la compétitivité dans le domaine considéré, mais il faut aussi constater que, face aux nouvelles réalités et exigences soulignées plus haut, les moyens et les outils disponibles ne suffisent plus toujours à la tâche : dans l'état actuel de la science et de la technologie, la recherche opérationnelle et l'architecture traditionnelle des micro-ordinateurs et des stations de travail utilisant le mode séquentiel s'avèrent souvent inadéquates face aux besoins de puissance de traitement que requiert le développement de nouveaux systèmes d'analyse, de planification, de gestion et d'aide à la prise de décision dans de nombreux domaines d'avant-garde en transport. Si l'on ajoute à cela les exigences plus classiques de flexibilité, de portabilité, de convivialité et, surtout, de rentabilité économique, ce sont les mini-ordinateurs d'une part et les super-ordinateurs d'autre part qui eux aussi se trouvent également remis en question.

Les problèmes de recherche opérationnelle que soulèvent les nouveaux systèmes mentionnés ci-dessus, problèmes qui seront décrits plus en détail dans la suite de cet article, partagent heureusement une caractéristique essentielle commune qui suscite une idée centrale, à savoir celle du recours à des ordinateurs à architecture parallèle : tous ces problèmes en effet peuvent être modélisés sous la forme de *problèmes de réseaux*, et ils sont naturellement *décomposables*, souvent de plusieurs façons différentes (par exemple, par groupes de véhicules, par paires origine-destination, ...) en sous-problèmes de taille ou complexité réduite. Ces

deux notions clés – celle de réseau d'une part et celle de décomposabilité d'autre part – conjuguées aux exigences de puissance de calcul constituent une invitation manifeste à explorer le potentiel du traitement en parallèle, puisqu'elles suscitent l'idée de traiter *simultanément* différentes parties ou composantes du problème de réseau initial sur plusieurs processeurs qui travaillent en parallèle.

L'émergence du parallélisme constitue un courant majeur et inévitable de l'évolution des architectures de traitement, un courant qui est en fait une conséquence directe des caractéristiques physiques du support microélectronique: les architectures actuelles, dites séquentielles, s'approchent des limites de performance, limites qui ne pourront vraisemblablement être contournées que par une multiplication des sites de traitement fonctionnant simultanément et de manière coopérative, c'est-à-dire par une exploitation du parallélisme. Les éléments conduisant à une exploitation efficace de cette nouvelle technologie constituent un domaine de recherche qui est largement perçu comme hautement stratégique, ce qui suscite un certain nombre de défis. Certaines difficultés proviennent notamment des formes très variées que peut épouser le parallélisme, depuis celle d'un réseau de systèmes puissants couplés de manière relativement lâche (approche MIMD – *Multiple Instruction Stream, Multiple Data Stream*), jusqu'à celles composées de centaines de milliers de processeurs plus modestes mais dotés de moyens de communications denses et très rapides (approche SIMD – *Single Instruction Stream, Multiple Data Stream*, dite massivement parallèle). Des machines combinant ces deux approches commencent à voir le jour, de façon expérimentale et avec un prix prévu de plusieurs centaines de millions de dollars U.S.

D'où également un problème de rentabilité: en fait, de nombreux travaux de recherche et développement sont aujourd'hui en cours dans le domaine du parallélisme, mais cela en général sur des machines très coûteuses qui ne sont justifiées que dans des secteurs disposant de très gros budgets, comme la défense nationale et la recherche aérospatiale. Heureusement, avec la possibilité aujourd'hui d'utiliser une technologie à base de *transputers*, les coûts ont sensiblement baissé tout en maintenant un très haut niveau d'efficacité et de puissance. A cet excellent compromis *efficacité + puissance* vs. *coûts*, le transputer ajoute par ailleurs l'avantage considérable de la modularité, c'est-à-dire la possibilité de construire des systèmes qui peuvent grandir progressivement et gagner de la puissance en fonction des besoins.

A terme, tous les secteurs d'application de l'informatique pourraient bénéficier du parallélisme, et de fait ce nouveau courant technologique a déjà entamé sa phase d'exploitation commerciale. On est encore loin d'une utilisation généralisée, mais au fur et à mesure du progrès technologique et de l'ouverture des marchés, il est tout à fait prévisible que certaines formes de parallélisme deviendront accessibles à des coûts modestes et que leur utilisation pourra se généraliser; des ordinateurs à architecture parallèle (à base de transputers) sont d'ailleurs déjà disponibles à des prix se situant autour de 50 000 US$. Ce scénario que la plupart des experts, sinon tous, jugent très réaliste représente une opportunité de recherche-développement exceptionnelle pour l'industrie du transport puisque, comme on l'a souligné plus haut, plusieurs des domaines d'avant-garde en transport présentent des exigences et des caractéristiques techniques qui justifient tout particulièrement bien le recours à la technologie du calcul parallèle.

3. FONDEMENTS THÉORIQUES ET MÉTHODOLOGIQUES

Le domaine très vaste des méthodes quantitatives et notamment de la recherche opérationnelle appliquées à la planification et à la gestion des systèmes de transport a évolué constamment au cours des quarante dernières années, de concert avec l'évolution de l'informatique. Ces progrès concomittants ont été marqués, entre autres, par la définition d'un ensemble de "problèmes de base" de plus en plus complexes et par leur traitement à l'aide d'une batterie de modèles mathématiques, de méthodes de résolution et d'algorithmes dont la performance s'est sans cesse améliorée. Ces problèmes, modèles et algorithmes constituent les fondements théoriques et méthodologiques de la recherche opérationnelle en transport, fondements qui ont servi et servent de cadre au développement d'outils informatisés d'analyse, de planification et de gestion des systèmes de transport, notamment dans les domaines d'avant-garde qui nous occupent ici.

Tout cela signifie que pour explorer et tirer parti du potentiel de la technologie des ordinateurs à architecture parallèle dans ces domaines d'avant-garde (voir la section 5), il est nécessaire de commencer par l'étude des fondements théoriques et méthodologiques en question ci-dessus. Les problèmes de base auxquels nous nous intéressons peuvent être abordés selon trois dimensions :

(I) ***Modélisation mathématique***

Le recours au parallélisme peut avoir des effets importants sur la définition même des modèles (on préférera, par exemple, modéliser le trafic sur un réseau de transport sous la forme de flux sur les chemins plutôt que sur les arcs), ainsi que sur le niveau de détail et donc de réalisme de ces modèles (le parallélisme permettant en général une désagrégation plus fine).

(II) ***Traitement algorithmique***

L'idée centrale du parallélisme étant de distribuer les tâches devant être réalisées par les algorithmes entre différents processeurs, c'est le design et la structure de ces algorithmes de résolution qui doivent être conçus ou revus en fonction de cette répartition des tâches et du type d'architecture parallèle envisagée.

(III) ***Gestion et implantation informatique***

Dès lors qu'on a recours à un environnement à architecture parallèle, le design des modèles et algorithmes, ainsi que l'efficacité de ceux-ci, sont fortement affectés à la fois par:

- l'organisation physique du réseau de processeurs (organisation spatiale, connections physiques ou logiques, etc.);
- l'organisation fonctionnelle (définition des rôles des processeurs: hiérarchique – maître/esclaves – , ou collégiale, par exemple) et le type de communication (synchrone ou asynchrone) de ce réseau;
- la codification proprement dite des algorithmes.

En guise d'illustration, nous considérons plus en détail ci-dessous trois grandes classes de problèmes et de méthodes générales qui se prêtent particulièrement bien au traitement par calcul parallèle : 1) les problèmes statiques de flots dans les réseaux; 2) les problèmes incorporant explicitement les aspects dynamiques et les facteurs d'incertitude qui caractérisent souvent les sytèmes et opérations de transport, et 3) les méthodes de résolution plus générales s'appliquant à différents problèmes fréquents en transport.

3.1 PROBLÈMES STATIQUES DE FLOTS DANS LES RÉSEAUX

On a regroupé sous cette rubrique cinq catégories bien définies de problèmes de base et de modèles fondamentaux de la recherche opérationnelle en transport.

(I) ***Problèmes de plus courts chemins***

Cette classe de problèmes porte sur la détermination du ou des chemins les plus courts – en termes de distance, ou de temps, ou de tout autre critère de coût généralisé – entre différents noeuds d'un réseau de transport : d'un noeud à un autre, ou d'un noeud à tous les autres, ou encore entre toutes les paires de noeuds. Ces problèmes fondamentaux se retrouvent sous diverses formes dans tous les secteurs du transport, qu'il s'agisse de transport de personnes ou de marchandises.

On s'intéresse ici principalement aux problèmes de très grande taille pour lesquels les techniques de calcul en parallèle seront appliquées à l'analyse de différents algorithmes, et en particulier aux algorithmes qui font appel à une décomposition des graphes, aux algorithmes basés sur une recherche guidée, et à la classe plus récente des algorithmes basés sur l'approche "auction" de type dual [2,5,34,35,38].

(II) ***Problèmes de flot de plusieurs produits à coût minimum (coûts linéaires sur les arcs)***

Pour un réseau de transport donné – en particulier en termes de capacités et de coûts de transport unitaires sur les arcs – et pour des matrices O-D (origine-destination) données décrivant, par exemple, la demande de transport relative à différentes produits, les problèmes envisagés ici consistent à déterminer l'affectation simultanée de tous les flux O-D qui

minimisent le coût total de transport en respectant les contraintes de capacité.

Les problèmes de ce type sont difficiles à résoudre, surtout lorsqu'ils sont de grande taille, à cause des contraintes "liantes" (de capacité surtout, mais d'autres variantes sont également possibles) sur les arcs du réseau. Lorsque c'est possible, ces contraintes sont "relaxées", ce qui génère le plus souvent un problème de multiflots à coûts convexes (voir III) [12,42]. Dans le cas contraire, des méthodes de décomposition s'imposent. Une première approche de parallélisme consiste à allouer un ou plusieurs sous-problèmes à chaque processeur, tandis qu'un processeur "maître" distribue et coordonne les tâches.

Bien sûr, une efficacité accrue peut-être obtenue lorsque suffisamment de processeurs sont disponibles afin de permettre une décomposition encore plus fine de chaque sous-problème. Cette approche prometteuse ne semble pas avoir été étudiée dans la littérature, où beaucoup d'attention fût accordée à la parallélisation à grain très fin ([55], par exemple) sur des machines de très grande puissance (massivement parallèles et à coût d'achat très important).

(III) ***Problèmes de flot de plusieurs produits à coût convexe (minimisation du coût total)***

Ces problèmes sont semblables à ceux de la catégorie II, mais la congestion y est formalisée par des fonctions de coût convexes sur les arcs. Notons que lorsque seulement les vecteurs d'offre et de demande sont connus, ces problèmes et ceux de la catégorie II correspondent à la détermination

simultanée des flots optimaux et d'une matrice O-D correspondante. Ce type de problème est à la base de plusieurs modèles de transport (par exemple, en transport de marchandises où des flots de plusieurs types de produits utilisent le même réseau) et est aussi très répandu dans d'autres domaines (affectation du trafic des réseaux de télécommunication, par exemple).

La décomposition naturelle par produits a mené à l'élaboration de méthodes de décomposition (Gauss-Seidel) par blocs (de produits) pour la résolution de tels problèmes [29]. L'approche de parallélisation envisagée ici est une "approche à deux niveaux maître-esclave", similaire à celle évoquée en II. Dans ce contexte, chaque sous-problème est à son tour un problème de flot à coût convexe à un produit qui peut être résolu par la méthode d'approximation linéaire [29]. Si le nombre de processeurs le permet, une hiérarchisation de ceux-ci permet une parallélisation efficace de cette méthode [7]. D'autres méthodes sont également étudiées, tel qu'indiqué en IV.

(IV) ***Problèmes d'affectation statique (modèles d'équilibre)***

On considère ici des problèmes de flot équivalents à ceux d'écrits en III, mais qui se posent surtout dans le domaine du transport de personnes au niveau urbain (transport en commun ou en automobile). Cela implique que, au lieu de viser un "optimum coopératif" (c'est-à-dire optimal pour l'ensemble du système considéré), on doit rendre compte du fait que chaque usager essaie de minimiser son propre coût de transport (optimisation "égoïste"). Dans le cas statique considéré ici, on modélise

l'état moyen du système durant une période donnée, par exemple durant l'heure de pointe du matin.

Les formulations de ces problèmes dans l'espace des flots d'arcs ont été largement étudiées [19]. Les implantations classiques utilisent la méthode d'approximation linéaire [1]. Une approche de parallélisation de cette méthode consistant à distribuer le traitement des arcs sur différents processeurs a déjà été implantée avec succès sur un réseau de transputeurs [7]. Cette approche de parallélisation n'a pas affecté le taux de convergence de la méthode. D'autres approches de parallélisation se sont aussi avérées efficaces pour des problèmes ayant peu de paires O-D (une dizaine) [41]. On peut considérer la parallélisation d'algorithmes ayant un meilleur taux de convergence que la méthode d'approximation linéaire, dont les algorithmes de décomposition (Jacobi et Gauss-Seidel) et ceux utilisant l'information de deuxième ordre (Newton et Quasi-Newton) pour la résolution du problème formulé dans l'espace des flots de chemins [40]. On peut aussi envisager une approche de parallélisation par distribution des blocs (paires O-D) entre les différents processeurs pour la méthode de décomposition, ainsi que l'implantation d'une version asynchrone de cette méthode [3]. Une approche de parallélisation par partitionnement du réseau est possible pour les autres méthodes (gradient, Netwon, etc.). Ces approches ne semblent pas avoir été étudiées dans la littérature.

(V) ***Problèmes de design de réseaux de transport***

Cette famille de problèmes, très générale, recouvre toutes les situations dans lesquelles on doit définir un réseau de transport (infrastructure

physique ou réseau de services) afin de satisfaire une demande de transport habituellement exprimée sous la forme d'une ou plusieurs matrices O-D. La fonction objectif à optimiser comporte en général des termes relatifs aux coûts de construction (dans le cas d'infrastructures physiques), d'opération (dans le cas de services) et d'utilisation du réseau ainsi défini et, le cas échéant, d'autres termes décrivant la performance de celui-ci (par exemple, des mesures sur la pollution résultant de l'utilisation d'un réseau routier urbain, ou des mesures de qualité du service offert en transport des marchandises). Il s'agit donc de réaliser un arbitrage entre ces divers termes souvent contradictoires.

On distingue deux grandes sous-classes de problèmes dans cette famille: d'une part celle dans laquelle l'organisme ou l'entreprise responsable du design contrôle les itinéraires empruntés par les "objets" transportés (c'est ordinairement le cas pour le transport des marchandises); d'autre part, celle dans laquelle les usagers du réseau utilisent celui-ci de façon à minimiser leur coût de transport propre (l'exemple classique de cette situation étant un réseau routier dans lequel les automobilistes choisissent leurs itinéraires indépendamment). Dans un cas comme dans l'autre, la résolution du problème posé sous forme mathématique comporte plusieurs difficultés sur le plan algorithmique:

- les réseaux à traiter sont presque toujours de taille importante;
- la seule évaluation (du point de vue de l'objectif à optimiser) d'un design possible implique la résolution d'un sous-problème de flots pour déterminer les itinéraires empruntés sur le réseau (pour la première

sous-classe, il s'agira d'un problème de la catégorie II ou III et pour la seconde d'un problème d'affectation comme en IV);

- ce sont le plus souvent des problèmes présentant un fort caractère combinatoire.

Ce caractère fortement combinatoire des problèmes à traiter implique le recours à des méthodes de recherche arborescente (voir VIII) si l'on veut les résoudre de manière exacte, ou à des heuristiques puissantes (voir, par exemple, IX et X) si l'on recherche seulement une bonne solution approximative.

A cause de la grande complexité de ces problèmes, on peut penser à diverses approches de parallélisation. On peut, d'une part, paralléliser la stratégie de recherche d'une bonne solution (exacte ou approchée) en adaptant les méthodes développées en VIII, IX ou X: chaque processeur considère à un instant donné un design possible différent et effectue tous les calculs nécessaires à son évaluation (par un algorithme séquentiel de résolution pour les sous-problèmes). On peut, d'autre part, utiliser une stratégie de recherche séquentielle dans laquelle on parallélise l'évaluation de chaque design (en employant des algorithmes parallèles pour les sous-problèmes semblables à ceux développés en II, III ou IV). Finalement, si l'on dispose d'un nombre suffisant de processeurs, on peut combiner ces deux approches en parallélisant à la fois la stratégie de recherche et la résolution des sous-problèmes.

3.2 PROBLÈMES DYNAMIQUES DE FLOTS DANS LES RÉSEAUX

Dans les problèmes et modèles dynamiques, on prend en compte, de façon explicite, l'évolution dans le temps des systèmes de transport et, dans plusieurs cas aussi, l'incertitude inhérente à certains aspects de ces systèmes (demandes inconnues à l'avance, variabilité des temps de parcours, etc.). Très clairement donc, la formulation et surtout la résolution de ces problèmes requièrent au préalable l'étude des problèmes plus simples, statiques et déterministes.

En fait, c'est le degré élevé de détail et de complexité introduit dans les modèles par la prise en compte des dimensions dynamiques et stochastiques qui désigne le parallélisme comme voie privilégiée d'approche, tout en préparant progressivement le terrain pour plusieurs applications (voir la section 4).

(VI) ***Problèmes de planification/gestion sur réseaux dynamiques stochastiques***

Cette famille de problèmes est extrêmement variée et étendue puisqu'elle s'adresse à toutes les situations dans lesquelles on s'intéresse aux déplacements dans le temps de personnes ou d'objets (véhicules, lots de marchandises, ...) sur un réseau dont certains paramètres (temps de parcours des arcs, capacités, demandes, ...) ne sont pas connus avec certitude, ces paramètres étant alors décrits par des variables aléatoires dont on connaît les distributions de probabilité. Un exemple typique de ces problèmes est celui de la gestion opérationnelle d'une flotte de conteneurs sur un horizon de planification de plusieurs périodes : il s'agit d'allouer et de repositionner les conteneurs vides de façon à satisfaire la demande présente pour ceux-ci (qui est connue) et être en mesure de répondre adéquatement aux demandes prévues dans le futur (qui sont incertaines), cela en minimisant les coûts de transport de conteneurs et

des pénalités pour les demandes non-satisfaites (voir [9] pour plus de détails).

Ces problèmes sont généralement formulés comme des *programmes stochastiques* qu'il est, en général, assez difficile de résoudre par des approches conventionnelles, surtout si, comme c'est habituellement le cas pour des applications pratiques, le réseau considéré est d'assez grande taille. Les méthodes de calcul parallèle permettent par contre d'envisager des approches algorithmiques efficaces pour le traitement de ces problèmes. Parmi celles-ci, nous en retenons trois qui paraissent particulièrement prometteuses.

La première d'entre elles est basée sur un algorithme itératif propre à la programmation stochastique dans lequel on résout de manière répétitive des ensembles de sous-problèmes déterministes correspondant à tous les scénarios (réalisations) possibles pour les paramètres aléatoires du réseau [6]. On peut grandement accélérer cet algorithme en parallélisant des phases de résolution des sous-problèmes et en affectant à chaque processeur la résolution des sous-problèmes correspondant à un ou plusieurs des scénarios. Il convient de souligner que les sous-problèmes se présenteront généralement sous la forme de problèmes de flot à coût minimum (coûts linéaires – voir II ou convexes – voir III). On peut comparer cette approche à celle de Mulvey et Vladimirou [36,37], développée pour l'analyse de phénomènes financiers et dont la parallélisation a généralement eu recours aux machines massivement parallèles [55].

La seconde de ces approches repose sur un découpage du réseau en plusieurs portions. Il s'agit ici de découper, pour chacune des étapes de l'algorithme de résolution choisi, le réseau en grands morceaux qui sont en fait presque

indépendants et de réaliser les calculs relatifs à chacun de ces morceaux du réseau sur un processeur propre.

Finalement, on peut envisager d'exploiter la structure dynamique du problème en effectuant une décomposition du problème par période. Dans une telle décomposition, chaque processeur aura la charge d'une période spécifique et effectuera tous les calculs relatifs à celle-ci. Une telle approche ne semble jamais avoir été mise en oeuvre, mais il y a là place pour des développements théoriques et algorithmiques des plus intéressants à comparer aux applications directes de la décomposition par la méthode de Benders [11].

(VII) ***Problèmes d'affectation dynamique***

Cette catégorie regroupe des problèmes de même type que ceux de la catégorie IV, mais cette fois on s'intéresse à la dimension dynamique des phénomènes en jeu, c'est-à-dire à l'évolution de l'état du système de transport dans le temps au lieu de considérer seulement l'état typique du système, durant une période donnée.

Plusieurs modèles ont été présentés dans la littérature scientifique. Certains consistent à affecter les flots, selon le même principe qu'en IV, sur un hyper-réseau espace-temps; celui-ci est construit explicitement dans [13,49,51], et implicitement dans [22,31]. D'autres modèles sont basés sur des hypothèses d'apprentissage des usagers (voir [52] pour ce qui concerne le transport en commun et [14,15] pour le transport privé). Ces derniers sont plus proches de la simulation que de l'optimisation; à chaque itération (tranche de temps), on suppose que les usagers réévaluent leur chemin en fonction de leur connaissance de l'état du réseau.

Dans le premier type de modèle, les algorithmes séquentiels et parallèles discutés en IV peuvent être adaptés à l'hyper-réseau espace-temps. Pour le second type de modèle, on peut subdiviser le réseau et le distributer aux différents processeurs. A chaque itération, chaque processeur traite la dynamique des flots sur le sous-réseau correspondant, un processus de communication assurerait le transfert adéquat des flots aux frontières des sous-réseaux (d'un processeur à ses voisins).

3.3 MÉTHODES DE RÉSOLUTION

On examinera ici des méthodes de résolution appliquables à plusieurs classes importantes de problèmes, et en particulier les problèmes combinatoires ou stochastiques. Cinq groupes de méthodes retiennent notre attention.

(VIII) ***Méthodes de recherche arborescente***

Ces méthodes d'optimisation sont celles les plus couramment utilisées pour la résolution exacte de très nombreux problèmes de programmation mathématique impliquant des variables entières. Elles consistent à construire progressivement un arbre d'analyse de l'espace des solutions possibles. Cet arbre peut atteindre une taille considérable, ce qui explique que ces méthodes, quoique "sûres", soient généralement lentes. C'est dans ce contexte que l'approche parallèle offre la possibilité de résoudre rapidement et de façon exacte des problèmes pour lesquels on devait se contenter de solutions approchées [46].

Plusieurs recherches ont déjà été effectuées sur l'intégration du calcul parallèle aux méthodes de recherche arborescente [39]. En utilisant le problème du voyageur de commerce comme application (problème fondamental en

recherche opérationnelle, fortement combinatoire et très difficile à résoudre exactement), Pruul [47] a appliqué des méthodes de type MIMD, tandis que Kindervater et Trienekens [31] ainsi que Trienekens [54] montrent qu'une approche maître-esclave peut être efficace lorsque le temps d'évaluation (c'est-à-dire de travail sur chaque processeur) dépasse le temps de communication interprocesseur; elle peut même être plus intéressante que des méthodes collégiales asynchrones [48].

Des méthodes particulières ont aussi été développées pour tirer parti des architectures des machines disponibles [42]. On pense ici à l'environnement distribué de Finkel et Manber [17] où plusieurs processeurs de capacité limitée sont interreliés et coopèrent en échangeant des messages, ou à l'hypercube étudié par Pardalos et Rodgers [39].

Nous avons entrepris avec succès au C.R.T. l'étude de la parallélisation d'une méthode de recherche arborescente dans le contexte de problèmes stochastiques (volet VI) [16] et de design de réseau (volet V) [24]. Nous avons montré en particulier que l'organisation physique et de communication du réseau de transputers joue un rôle déterminant pour l'efficacité de l'algorithme [25].

On peut envisager d'autres développements des méthodes de recherche arborescente parallèles, particulièrement pour les problèmes de ces deux activités. Ainsi, entre les diverses topologies et méchanismes de contrôle et de communication du réseau de transputers, on peut développer plusieurs approches de décomposition des tâches, ainsi que la combinaison avec des méthodes parallèles de recherche avec tabous (voir IX).

(IX) ***Méthodes heuristiques de recherche avec tabous***

Ces méthodes, très récentes, s'adressent également aux problèmes d'optimisation avec variables entières, mais il s'agit cette fois de méthodes heuristiques. Elles consistent à explorer de façon itérative l'espace des solutions possibles en gardant à chaque itération une certaine quantité d'informations sur les solutions visitées au cours des itérations précédentes de façon à éviter que l'exploration ne "tourne en rond" [26, 27]. Des études récentes [8,23]) ont démontré le grand intérêt de ces méthodes, à la fois pour des problèmes combinatoires et pour les problèmes de design de réseau.

On peut paralléliser ces méthodes de façon intéressante en exécutant sur chaque processeur une exploration de l'espace des solutions à partir de points intitiaux différents. A certains instants spécifiés de cette exploration, les processeurs peuvent communiquer entre eux pour échanger des informations sur les résultats obtenus jusqu'à ce point, ces informations étant par la suite utilisées pour réorienter les trajectoires des processeurs vers les parties jugées les plus prometteuses de l'espace des solutions.

(X) ***Méthodes d'intelligence artificielle***

Les méthodes en question ici ont en commun l'emprunt de concepts qui relèvent de l'informatique théorique, et en particulier des approches d'intelligence artificielle: les méthodes heuristiques et les "réseaux neuronaux".

Les méthodes heuristiques de routing, qui trouvent des applications surtout en transport de marchandises, mais aussi en transport de personnes, assurent la construction progressive de routes de véhicules par insertion itérative des

lieux non encore visités [43]. Deux approches peuvent être retenues ici. Il est possible tout d'abord d'adapter certaines heuristiques classiques, développées il y a quelques années, aux nouvelles architectures parallèles [20,43]. Il est possible également de profiter de nouvelles méthodologies permettant d'exploiter à fond le parallélisme. C'est le cas par exemple de certaines techniques d'intelligence artificielle autorisant l'exploration parallèle de sous-régions distinctes de l'espace de recherche, telle la recherche en faisceau [21,44]. Ces méthodes construisent de fait plusieurs solutions distinctes en parallèle, en considérant plusieurs possibilités d'insertion à la fois. Elles se prêtent donc tout naturellement à une implantation sur une architecture distribuée.

Les réseaux neuronaux sont utilisés, entre autres, afin d'apprendre à reproduire automatiquement le processus de décision d'experts, tels les répartiteurs de véhicules, à partir d'exemples de décisions antérieures [45,50,53]. Les neurones sont les composants élémentaires de tels réseaux et leur mode de fonctionnement est essentiellement local. Ainsi, ils reçoivent des signaux de neurones voisins, traitent localement ces signaux et produisent une réponse qui est ensuite acheminée aux neurones voisins. Ce mode de fonctionnement distribué permet d'envisager une implantation parallèle où chaque neurone est supporté par un processeur distinct. Une telle implantation permettrait évidemment d'accélérer grandement les temps d'apprentissage, qui sont actuellement très longs avec les architectures séquentielles.

(XI) ***Maximisation de fonctions continues de vraisemblance***

Ce type de problème est important dans le domaine de l'économétrie appliquée au transport (par exemple, pour la construction de modèles de demande), ainsi que dans le cas de problèmes comportant un aspect stochastique, dans lesquels il faut estimer et calibrer les paramètres des distributions.

Les fonctions utilisées pour déterminer la vraisemblance d'échantillons composés d'observations considérées comme indépendantes ont comme format spontané celui d'un produit de fonctions élémentaires (par exemple, des probabilités) appliquées à chaque événement. Elles sont généralement calibrées après une transformation logarithmique qui en fait des sommes de fonctions élémentaires. Deux directions de recherche sont intéressantes:

- Échantillons de grande taille.

  L'estimation des paramètres (la calibration) est couramment faite sur des sous-échantillons de l'information disponible, en partie à cause du temps de calcul qui dépend en partie linéairement du nombre d'observations considérées, puisque chaque vecteur de paramètres considéré donne lieu à une évaluation de la somme des valeurs prises par les fonctions élémentaires, somme qui a autant de termes que le nombre d'observations. Par exemple, à cause des temps de calcul, on utilise actuellement au C.R.T. seulement 6000 observations d'un grand échantillon de 60 000 observations sur les déplacements interurbains entre plus de 300 villes.

- Intégration de contraintes continues et discrètes.

  L'estimation des paramètres peut tenir compte de contraintes continues, ou même discrètes, qui sont représentées par des transformations continues.

L'intégration de contraintes sous forme continue définit une deuxième dimension du problème de maximisation de la fonction de vraisemblance. Certaines contraintes peuvent notamment dans certains cas apparaître comme termes supplémentaires du produit (problème original) ou de la somme (problème transformé).

Le traitement parallèle pourrait donner lieu à des gains importants de temps calcul qui permettraient ou d'utiliser la totalité de l'échantillon disponible dans le premier cas, ou de tenir compte de davantage de contraintes dans le second cas.

4. APPLICATIONS À DES DOMAINES D'AVANT-GARDE EN TRANSPORT

Comme on l'a expliqué précédemment, l'application de l'informatique parallèle au domaine du transport résulte de nouvelles exigences socio-économiques et technologiques, et plus spécifiquement de l'émergence d'exigences auparavant jamais atteintes aux chapitres de la rapidité de traitement, de l'aptitude à réagir à l'incertain, et de la capacité à affronter des problèmes complexes de grande taille. Conjuguées à la "décomposabilité" des modèles et méthodes de recherche opérationnelle en jeu, ces exigences bien concrètes constituent, comme on l'a souligné, une réelle invitation à un recours à la technologie des ordinateurs à architecture parallèle. C'est donc dans la présente section consacrée aux applications que l'informatique parallèle trouve en fait sa justification véritable et sa raison d'être aux niveaux industriel et commercial. Trois domaines de pointe retiennent notre attention. Dans l'esprit de ce qui précède, chacun de ces domaines conjuge à la fois d'importants défis de recherche et un véritable potentiel industriel et commercial.

4.1 GESTION DYNAMIQUE DE FLOTTES DE VÉHICULES EN TEMPS RÉEL OU QUASI RÉEL

Ce volet couvre une large gamme de situations et de problèmes communs à de nombreuses entreprises.

(I) ***Dispatching dynamique de véhicules en milieu urbain.***

Ce problème concerne, entre autres, les entreprises de taxi, les entreprises de courrier rapide, les entreprises ou organismes assurant des services de transport de personnes handicapées, des services d'urgence (ambulances, police, ...), des services de réparation, etc.; il concerne aussi la partie cueillette et livraison des entreprises de transport interurbain de marchandises. Il s'agit d'allouer en temps réel ou quasi réel des véhicules à des requêtes provenant de clients répartis sur un territoire donné et demandant un service rapide, voire immédiat. Des fenêtres de temps peuvent éventuellement être associées aux requêtes (exemple: une heure d'arrivée au plus tôt sur le lieu de la requête ou une heure d'arrivée au plus tard). En général, plusieurs éléments de ces problèmes sont stochastiques (les lieux et moments de certaines requêtes sont inconnus à l'avance, la durée de visite sur les lieux des requêtes peut être très variable, etc.)

Dans la réalité, les tâches de répartition (dispatching) sont sous la responsabilité d'un répartiteur qui, à force d'expérience, parvient à assurer tant bien que mal les services demandés, mais dans un climat de stress souvent important; les états de "burn out" sont fréquents dans cette profession où la conception et le développement de systèmes d'aide à la décision (SAD) est une véritable nécessité.

De fait, de nombreux SAD ont déjà été développés, mais en général il ne s'agit que de systèmes d'information facilitant la gestion des requêtes/clients et la mise à jour de l'état des véhicules (localisation, activité en cours, ...), sans véritable outil capable de suggérer au répartiteur différentes stratégies possibles et réalisables d'affectation des véhicules aux requêtes. De tels outils relèvent des problèmes et méthodes de la recherche opérationnelle en transport.

En fait, ces différentes situations peuvent être regroupées en deux catégories distinctes. La première correspond, typiquement, aux services d'urgence (par exemple, les services d'ambulanciers); dans ce cas, il faut d'une part organiser la localisation des véhicules en attente sur le territoire considéré (de façon à assurer une couverture complète et homogène de celui-ci, en tenant compte des densités de population, des fréquences prévues des requêtes,...), et, d'autre part, pour chaque appel d'urgence, choisir un véhicule en attente et définir son itinéraire le plus rapide vers l'appel, puis vers la destination finale (par exemple, l'hôpital). Cette première catégorie de situations implique essentiellement des problèmes de plus courts chemins sur des réseaux étendus et denses. La seconde catégorie de situations correspond, typiquement, aux entreprises de courrier rapide et de cueillette et livraison; dans ce cas, le problème est essentiellement un problème de création de routes et de circuits de véhicules, avec la possibilité de procéder à des ajustements dynamiques, c'est-à-dire de modifier ces routes en temps réel, grâce par exemple aux systèmes de communication embarqués dans les véhicules, afin de réagir aux variations aléatoires de l'état du système (par exemple, l'arrivée de nouvelles requêtes).

Toutes ces situations combinent en fait les principales difficultés qui, tel qu'expliqué précédemment, justifient le recours au parallélisme: la nécessité de traitement rapide et l'obligation de prise en compte des dimensions dynamiques et stochastiques, cela sur des réseaux étendus et denses.

Les méthodes de réseaux de neurones apparaissent ici tout particulièrement indiquées. Dans le contexte du dispatching en temps réel, en effet, le processus de décision des "experts-répartiteurs" est difficile à modéliser mathématiquement. L'utilisation de techniques permettant à un système informatique d'apprendre à reproduire un processus de décision, à partir d'exemples de décisions antérieures, apparaît donc très prometteuse. L'équipe du C.R.T. a déjà entrepris quelques travaux en ce domaine [45].

(II) ***Gestion et contrôle en temps réel de services d'autobus***

Dans le cours des opérations d'un système de transport en commun, il arrive souvent que divers éléments (accidents, conditions climatiques, retards des véhicules, afflux soudain d'usagers à certains arrêts, etc.) viennent perturber l'horaire prévu des autobus et entraînent une dégradation inacceptable de la qualité du service offert. Dans ces conditions, il devient impératif de procéder à des réaménagements des horaires (par exemple, en changeant les heures des départs, ou en "injectant" sur certaines lignes des autobus gardés en réserve) aussi vite que possible pour rétablir la bonne marche des opérations.

À cette fin, divers organismes se sont dotés ou comptent se doter dans un avenir proche de systèmes de localisation automatique et de contrôle des autobus (*A.V.L.C. – Automatic Vehicle Location and Control*). Ces systèmes permettent d'une part de localiser de manière relativement précise les autobus

à tout instant (et donc de détecter l'occurence de situations inhabituelles) et d'autre part de communiquer avec ceux-ci pour leur transmettre des directives visant à corriger les situations inacceptables. L'efficacité de tels systèmes dépend de l'existence de modèles et d'algorithmes permettant de déterminer très rapidement (en temps réel) les conséquences probables des événements pertubant le service et celles des diverses actions correctives possibles, et donc de choisir parmi celles-ci les plus appropriées pour atteindre les objectifs fixés. Considérant l'aspect fortement aléatoire des opérations d'un système de transport en commun (surtout en période de pointe), il paraît naturel de formuler le problème de contrôle en temps réel d'un tel système comme un problème de flot sur un réseau dynamique stochastique (voir VII dans la section 3). Cependant, la résolution en temps réel, même de façon approchée, d'un tel problème pour un réseau de taille raisonnable implique la mise au point d'algorithmes spécialisés exploitant, par exemple, les possibilités du calcul parallèle.

(III) ***Gestion dynamique de systèmes de transport interurbain***

Sous ce titre se trouvent réunis un ensemble de problèmes de répartition de véhicules et de gestion de flotte en temps réel ou quasi réel et ayant en commun le fait que la fonction "transport" est exécutée sur un réseau interurbain. On retrouve dans ce groupe des problèmes de répartition dynamique de véhicules, des problèmes d'ajustement dynamique de services, de routes et d'horaires (véhicules et conducteurs), des problèmes d'évaluation dynamique de la demande de transport et d'ajustement de l'offre de service qui en découle, etc.

Les difficultés principales proviennent de la grande taille des problèmes considérés, des relations intertemporelles entre les décisions courantes et celles des périodes à venir, des incertitudes concernant la demande et la durée de certaines opérations (par exemple, l'arrêt chez certains clients), ainsi que des compromis à atteindre entre les objectifs économiques et ceux concernant la qualité du service à offrir.

(IV) ***Bourses de fret***

Ce domaine concerne la création et la gestion de réseaux d'échange de données informatisées (*E.D.I. – Electronic Data Interchange*) et de systèmes de gestion destinés à faciliter et à coordonner la "rencontre" de l'offre et de la demande dans le domaine du transport multimodal de marchandises. Il s'agit en particulier de déterminer de façon dynamique la meilleure route multimodale pour chaque demande de service, cela en fonction des critères particuliers de celle-ci et en s'assurant du traitement équitable de toutes les entreprises et organismes offrant leurs services dans le cadre de la bourse de fret.

4.2 SYSTÈMES VÉHICULES-ROUTES INTELLIGENTS (*I.V.H.S.-Intelligent Vehicle Highway Systems*)

Depuis quelques années, l'Europe, le Japon et les États-Unis ont lancé de vastes programmes de recherche visant à développer des systèmes de gestion et de contrôle en temps réel du trafic automobile en milieu urbain et suburbain. A l'aide d'ordinateurs et d'appareils de communication et de guidage à bord des véhicules, ces systèmes ont pour but, en gros, de réduire les graves problèmes de congestion, de pollution et de sécurité routière qu'on observe dans de nombreuses villes. L'appellation I.V.H.S. couvre d'autres travaux dans des domaines voisins

et avec des objectifs similaires, mais dans le cadre du présent article, on s'adresse seulement aux systèmes en question ci-dessus.

Le plus grand obstacle à l'implantation effective de tels systèmes, mis à part leurs coûts importants, est actuellement l'absence de modèles et d'algorithmes fiables pour fournir rapidement (en temps réel) aux automobilistes des directives qui feront en sorte que les objectifs ultimes de ces systèmes seront atteints.

Si l'on veut suggérer de bons itinéraires aux automobilistes, il n'est pas suffisant de connaître l'état actuel du réseau routier considéré, il faut aussi pouvoir déterminer les cheminements optimaux des véhicules, de leurs positions actuelles vers leurs destinations, en tenant compte de l'évolution prévisible des conditions de circulation sur l'ensemble du réseau pour une période de temps assez longue (possiblement une heure ou plus). La prédiction de cette évolution implique le recours à un modèle d'affectation dynamique du trafic (voir VII dans la section 3), défini de manière appropriée (en fait, l'existence du système de guidage modifie le comportement des usagers) et peuvent être résolus très rapidement. Cette exigence de rapidité est telle, compte tenu de la difficulté du problème à résoudre, que seule l'application de méthodes de calcul parallèle semble pertinente. En effet, il n'existe pas actuellement de logiciels d'affectation dynamique du trafic capables de réagir en temps réel; la plupart des chercheurs dans le domaine ont donc pris une approche basée sur un modèle approximatif de la réalité. Or, nous croyons qu'une évaluation en temps réel d'un modèle réaliste améliorerait significativement les performances du système. Le parallélisme offre maintenant cette possibilité à un coût raisonnable.

4.3 OUTILS DE FORMATION, D'EXPÉRIMENTATION ET DE TRANSFERT TECHNOLOGIQUE

Trois questions se posent ici : 1) Comment former des individus au travail complexe de planification et de gestion dans des entreprises ou organismes de transport? 2) Comment évaluer de nouvelles stratégies ou techniques en ce domaine sans les expérimenter en pratique, "*in situ*"? 3) Comment amener l'industrie du transport à prendre connaissance et à utiliser de nouvelles méthodes et outils d'analyse et d'aide à la prise de décisions? Ces trois questions soulèvent un même défi: celui du développement des compétences et connaissances spécialisées et de la modernisation technologique dans le domaine de la planification et de la gestion des transports.

C'est dans le but de fournir une réponse à la fois scientifique et concrète aux trois questions ci-dessus que des chercheurs du C.R.T. ont entrepris depuis quelques années la conception et le développement de simulateurs – ou laboratoires informatisés – destinés à être utilisés : 1) comme instrument de formation à la planification et à la gestion en transport, 2) comme cadre d'expérimentation pour l'analyse et l'évaluation de différents scénarios ou de différentes stratégies ou techniques en ce domaine, et 3) comme support au transfert technologique entre l'université et l'industrie, c'est-à-dire comme un moyen pour amener les entreprises et organismes de transport à se familiariser avec les nouvelles méthodes et techniques d'analyse et de planification ou de gestion élaborées à l'université. Ces simulateurs sont conçus sous la forme de jeux d'entreprise qui reproduisent des systèmes de transport impliquant une ou plusieurs sociétés de transport et qui font jouer aux participants-joueurs le rôle de planificateurs ou de gestionnaires. Ceux-ci y sont confrontés à des problèmes d'analyse et de prise de décisions comme

ceux qu'on rencontre en pratique dans de véritables entreprises, tout en pouvant par ailleurs utiliser des outils d'analyse et d'aide à la prise de décisions intégrés au simulateur. Les références [32] et [33] font état de ces travaux qui intègrent les techniques de la modélisation mathématique, de la recherche opérationnelle et de l'informatique graphique dans le cadre de l'approche que la littérature anglo-saxonne désigne par "*gaming-simulation*" [28].

La technologie des ordinateurs à architecture parallèle constitue un atout exceptionnel pour le développement des simulateurs en question ici. Il y a deux raisons à cela. La première est liée à la nécessité de vitesse : dans un environnement de formation et d'expérimentation, les temps de réaction de l'ordinateur doivent être rapides même si la simulation porte sur des phénomènes et des prises de décisions qui, dans la réalité, sont davantage étalés dans le temps. La seconde raison, c'est que la technique du parallélisme peut être mise à profit dans la conception et l'organisation proprement dite des simulateurs dans les cas où ceux-ci mettront en présence plusieurs participants. Ainsi, dans une situation de concurrence par exemple, chaque participant pourra être affecté à l'un des processeurs de sorte que les différents participants en jeu fonctionneront véritablement en concurrence, simultanément.

5. CONCLUSION

Il ne fait aucun doute que la recherche en transport peut et doit profiter des avantages qu'offre l'informatique parallèle. Plusieurs problèmes de base abordés par les techniques classiques de la recherche opérationnelle se prêtent d'ailleurs à merveille à cette technologie; de plus, de nombreuses méthodes de résolution connues peuvent également tirer parti du parallélisme. Il est clair également

que cette évolution ne se fera que de concert avec le développement d'outils informatiques adaptés aux besoins du calcul parallèle en recherche opérationnelle. En fait, certains domaines de pointe, comme la recherche sur les systèmes IVHS ne pourront se développer que si le mariage recherche opérationnelle – informatique s'effectue véritablement. Plusieurs des progrès méthodologiques et informatiques évoqués dans cet article ont maintenant dépassé l'étape de la recherche. Certains devraient donner lieu dans un avenir rapproché à des applications commerciales et industrielles qui répondent aux nouvelles exigences socio-économiques et technologiques du monde des transports.

BIBLIOGRAPHIE

1. Babin, A., Florian, M., James-Lefebvre, L., Spiess, H. (1982). "EMME/2 : An Interactive Graphic Method for Road and Transit Planning". *Transportation Research Record* 866, T.R.B., National Research Council, Washington D.C., 1–9.
2. Bertsekas, D.P. (1992). "An Auction Algorithm for Shortest Paths". LIDS-P-2000, MIT, à paraître dans *SIAM Journal on Optimisation.*
3. Bertsekas, D.P., Tsitsiklis, J.N. (1989). "Parallel and Distributed Computation, Numerical Methods". Prentice Hall, NJ.
4. Blais, J.-Y., Rousseau, J.-M., Lamont, J., (1990). "The Hastus Vehicle and Manpower Scheduling System at the Société de Transport de la Communauté Urbaine de Montréal". *Interfaces* 20, 26–42.
5. Blewet, W.J., Hu, T.C. (1977). "Tree Decomposition Algorithm for Large Networks". *Networks* 7, 289–296.
6. Breton, M., El Hachem, S. (1991). "Decomposition Algorithm for Stochastic Dynamic Programs". Publication no G-91–15, GERAD, École des Hautes Études Commerciales, Montréal.
7. Chabini, I. (1990). "Des implantations parallèles de l'algorithme d'approximation linéaire pour la résolution du problème d'affectation du trafic". Mémoire de maîtrise, Département d'informatique et recherche opérationnelle, Université de Montréal.

8. Crainic, T.G., Gendreau, M., Soriano, P., Toulouse, M. (1991). "A Tabu Search Procedure for Multicommodity Location/Allocation with Balancing Requirements". Publication no. 797, Centre de recherche sur les transports, Université de Montréal. A paraître dans *Annals of Operations Research.*

9. Crainic, T.G., Gendreau, M., Dejax, P. (1993). "Dynamic Stochastic Models for the Allocation of Empty Containers". À paraître dans *Operations Research.*

10. Crainic, T.G., Florian, M., Guélat, J., Spiess, H. (1990). "Strategic Planning of Freight Transportation: STAN, an Interactive-Graphic System". *Transportation Research Record 1282*, T.R.B., National Research Council, Washington, D.C., 97–124.

11. Dantzig, G.B., Glynn, P.W. (1990), "Parallel Processors for Planning under Uncertainty". *Annals of Operations Research* 22, 1–21.

12. Dembo, R.S., Pinar, M.C., Zenios, S.-A. (1991), "A Smooth Penalty Function Algorithm for Network-Structured Problems". Report 90–12–05, Decision Sciences Department, The Wharton School, University of Pennsylvania.

13. Drissi-Kaïtouni, O., Benchekroun Hameda, A. (1992). "A Dynamic Traffic Assignment Model and a Solution Algorithm". *Transportation Science* 26, 119–128.

14. Drissi-Kaïtouni, O., Gendreau, M. (1992). "A New Dynamic Traffic Assignment Model". 71st Annual Meeting, Transportation Research Board, Washington.

15. Drissi-Kaïtouni, O. (1990). "A Model for the Dynamic Traffic Assignment Problem". Publication no. 702, Centre de recherche sur les transports, Université de Montréal.

16. Dror, M., Laporte, G., Louveaux, F.V. (1991). "Vehicle Routing with Stochastic Demands and Restricted Failures". Publication no. 773, Centre de recherche sur les transports, Université de Montréal.

17. Finkel, R., Manber, U. (1987). "DIB – A Distributed Implementation of Backtracking". *ACM Transactions on Programming Languages and Systems* 9, 235–256.

18. Florian, M. (1986). "Nonlinear Cost Network Models in Transportation Analysis". *Mathematical Programming Study* 26, 167–196.

19. Florian, M. (1984). "An Introduction to Network Models Used in Transportation Planning". *Transportation Planning Models*, M. Florian (ed.), North-Holland, Amsterdam, 137–152.

20. Foisy, C., Potvin, J.Y. (1992). "Implementing an Insertion Heuristic for Vehicle Routing on Parallel Hardware". Publication no. 817, Centre de recherche sur les transports, Université de Montréal.

21. Fox, M.S., Smith, S.F. (1984). "ISIS: A Knowledge-Based System for Factory Scheduling". *Expert Systems* 1, 25–49.

22. Gartner, N.H., Improta, G. (eds.) (1990). "Urban Traffic Networks". *Transportation Research B*, Special Issue, 24B, 407–495.

23. Gendreau, M., Hertz, A., Laporte, G. (1991), "A Tabu Search Heuristic for the Vehicle Routing Problem". Publication no. 777, Centre de recherche sur les transports, Université de Montréal.

24. Gendron, B., Crainic, T.G. (1992). "Parallel Implementations of a Branch-and-Bound Algorithm for Multicommodity Location with Balancing Requirements". Publication no. 813, Centre de recherche sur les transports, Université de Montréal.

25. Gendron, B. (1991). "Implantations parallèles d'un algorithme de séparation et évaluation progressive pour résoudre le problème de localisation avec équilibrage". Mémoire de maîtrise, Université de Montréal. Publication no. 761, Centre de recherche sur les transports.

26. Glover, F. (1989). "Tabu Search, Part I". *ORSA Journal on Computing* 1, 190–206.

27. Glover, F. (1990). "Tabu Search Part II", *ORSA Journal on Computing* 2, 4–32.

28. Greenblat, C. (1987). *Designing Games and Simulation.* Sage Publishing, Beverley Hills.

29. Guélat, J., Florian, M., Crainic, T.G. (1990). "A Multimode Multiproduct Network Assignment Model for Strategic Planning of Freight Flows". *Transportation Science* 24, 25–39.

30. Iida, Y., Kitamura, R. (eds.) (1990). "Dynamic Travel Behaviour Analysis". *Transportation Research A*, Special issue, 24A, 399–495.

31. Kindervater, G.A.P., Trienekens, H.W.J.M. (1988). "Experiments with Parallel Algorithms for Combinatorial Problems". *European Journal of Operational Research* 33, 65–81.

32. Lardinois, C., Crainic, T.G., Gendreau, M. (1990). "Conception et développement d'un simulateur d'entreprises de camionnage à des fins de formation, d'expérimentation et de transfert technologique". *Les Cahiers Scientifiques du Transport* 22, 51–64.

33. Lardinois, C. (1989). "Simulation, Gaming and Training in a Competitive Multimodal Multicompany Intercity Passenger Transportation Environment. *Journal of the Operational Research Society* 40, 849–861.

34. Liu, J.W.H. (1989). "A Graph Partitioning Algorithm by Node Separators". *ACM Transactions on Mathematical Software* 15, 198–219.

35. Mohz, T., Pasche, C. (1988). "A Parallel Shortest Path Algorithm". *Computing* 40, 281–292.

36. Mulvey, J.M., Vladimirou, H. (1990). "Stochastic Network Programming for Financial Planning Problems". Report SOR-89–7, Department of Civil Engineering and Operations Research, Princeton University, NJ.

37. Mulvey, J.M., Vladimirou, H. (1990). "Applying the Progressive Hedging Algorithm to Stochastic Generalized Networks", Report SOR-89–9, Department of Civil Engineering and Operations Research, Princeton University, NJ.

38. Pallottino, S., Scutellà, M.G. (1991). "Strongly Polynomial Auction Algorithms for Shortest Paths". TR-19/91, Dipartimento di Informatica, Università di Pisa.

39. Pardalos, P.M. and Rodgers, G.P. (1990). "Parallel Branch-and-Bound Algorithms for Quadratic Zero-One Program on the Hypercube Architecture". *Annals of Operations Research* 22, 271–292.

40. Patriksson, M. (1991). "Algorithms for Urban Traffic Network Equilibria". Thesis no. 263, Department of Mathematics, Institute of Technology, Linköping University, Suède.

41. Pinar, M.C., Zenios, S.A. (1992). "A Comparative Study of Parallel Decompositions for Multicommodity Flow Problems". Report 91–07–07, Decision Sciences Department, The Wharton School, University of Pennsylvania.

42. Pinar, M.C., Zenios, S.A. (1991). "Parallel Decomposition of Multicommodity Network Flows Using a Linear-Quadratic Penalty Algorithm". A paraître dans *ORSA Journal on Computing*.

43. Potvin, J.Y., Rousseau, J.-M. (1992). "A Parallel Route Building Algorithm for the Vehicle Routing and Scheduling Problem with Time Windows". A paraître dans *European Journal of Operational Research*.

44. Potvin, J.Y., Rousseau, J.-M. (1992). "Constraint-Directed Search for the Advanced-Request Dial-a-Ride Problem with Service Quality Constraints". A paraître dans *Computers & Operations Research*.

45. Potvin, J.-Y., Shen, Y., Rousseau, J.-M. (1992). "Neural Networks for Automated Vehicle Dispatching". *Computers & Operations Research*, 19, 267–276,

46. Pruul, E.A., Nemhauser, G.L., Rushmeier (1988). "Branch-and-Bound and Parallel Computation: A Historic Note". *Operations Research Letters* 7, 65–69.

47. Pruul, E.A. (1975). "Parallel Processing and a Branch-and-Bound Algorithm", Mémoire de maîtrise. Cornell University, NY.

48. Quinn, M.J. (1990). "Analysis and Implementation of Branch-and-Bound Algorithms on a Hypercube Multicomputer". *IEEE Transactions on Computers* 39, 384–387.

49. Quinton, P., Van Dongen V., (1989), "The Mapping of Linear Recurrence Equations on Regular Arrays". *The Journal of VLSI Signal Processing*, 95–113.

50. Ran, B., Boyce, E.D., LeBlanc, L.J. (1991). "Solving an Instantaneous Dynamics User-Optimal Traffic Assignment Model". Urban Transportation Center, University of Illinois at Chicago.

51. Rumelhard, D., McClelland, J.L. (1986). "Parallel Distributed Processing: Explorations". *Microstructure of Cognition.* The MIT Press, Cambridge, MA.

52. Sawack, D.J., Thompson, G.L. (1987). "A Dynamic Space-Time Network Flow Model for City Traffic Congestion". *Transportation Science* 21, 153–162.

53. Shen, Y., Potvin, J.-Y. (1992). "Simulating the Process of Multi-Attribute Choice with Neural Networks". Soumis à *International Joint Conference on Neural Networks.*

54. Trienekens, H.W.J.M. (1986). "Parallel Branch-and-Bound on a MIMD System". Report 8640/A, Econometric Institute, Erasmus University, Rotterdam.

55. Zenios, S.A., Censor, Y. (1990). "Massively Parallel Row-Action Algorithms in some Nonlinear Transportation Problems". Report 89–09–10, Decision Sciences Department, The Wharton School, University of Pennsylvania.